

03

Неустойчивости течения двухфазного потока в коротких плоских микроканалах

© Е.А. Чиннов, О.А. Кабов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, Россия
Исследовательский центр Микрогравитации Свободного университета
г. Брюсселя, Бельгия
E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 16 марта 2011 г.

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в прямоугольных коротких горизонтальных каналах высотой от 100 до 500 μm . Для определения характеристик двухфазного течения в каналах использованы флуоресцентный и Шлирен методы. Показано, что формирование режимов двухфазного течения и переход между ними определяются неустойчивостью газожидкостного течения в боковых частях каналов. В канале высотой 100 μm обнаружена фронтальная неустойчивость при взаимодействии жидкости и газа при выходе жидкости из сопла.

Уменьшение характерных размеров устройств в различных областях техники, например в аэрокосмической индустрии, электронике, транспорте, энергетике и медицине, определяет развитие исследований гидродинамики газожидкостных течений и теплообмена в микросистемах и микроканалах. Исследования двухфазных течений в круглых трубах выполнены до диаметра, равного 20 μm [1], а в горизонтальных щелевых каналах — до толщины, равной 200 μm [2]. Обзор работ по режимам двухфазных течений в каналах различной геометрии содержится в [3], где показано, что в большинстве опубликованных работ рассматриваются относительно длинные каналы. В биочипах и системах охлаждения микроэлектроники длина каналов ограничена. На борту космических аппаратов и международной космической станции также существуют жесткие ограничения на размеры используемых и исследуемых систем. Несмотря на актуальность, исследования двухфазных течений в коротких каналах весьма ограничены. Изучение режимов двухфазных течений в коротких горизонтальных каналах выполнено в [4,5]. Обнаружены новые режимы течения (прерывистый, струйный

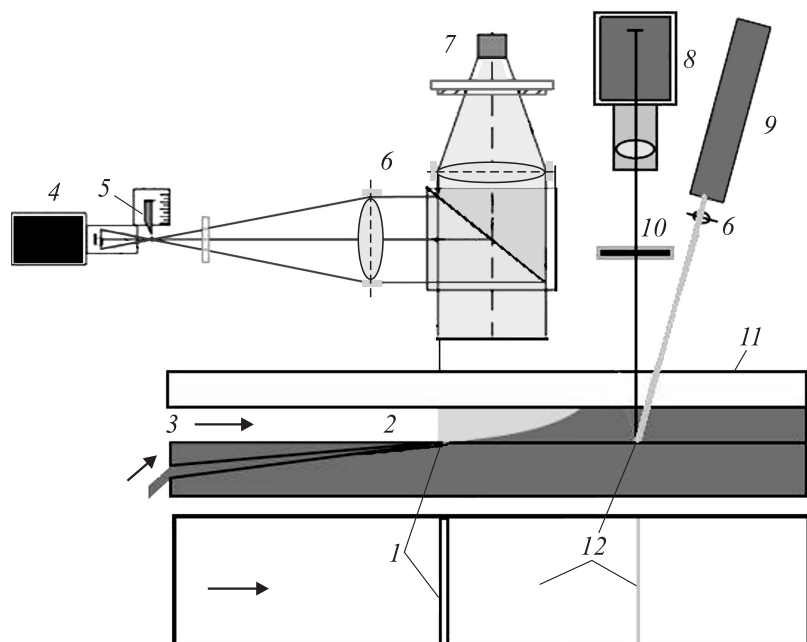


Рис. 1. Схема установки: 1 — плоское сопло для подачи жидкости, 2 — канал, 3 — ввод газа в канал, 4 — цифровая камера, 5 — нож, 6 — линзы, 7 — источник света, 8 — цифровая камера с линейным датчиком, 9 — лазер, 10 — светофильтр, 11 — стекло, закрывающее канал, 12 — зоны измерений.

и струйно-пузырьковый), которые могут быть связаны с новыми типами неустойчивости при течении двухфазной смеси в горизонтальных прямоугольных каналах малой высоты. Однако механизмы разных возможных типов неустойчивости не анализировались.

Целью данной работы является исследование разных типов неустойчивости взаимодействия жидкостных и газовых потоков в коротких горизонтальных каналах длиной 80 mm и высотой от 100 до 500 μm .

Основной частью рабочего участка являлась пластина из нержавеющей стали длиной 135 mm и шириной 60 mm, которая устанавливалась в основание из текстолита. Сверху пластина закрывалась крышкой из оптического стекла. Стенд включал два циркуляционных

контур по жидкости и газу, которые управлялись компьютером. На рис. 1 показаны рабочий участок с исследуемым каналом 2 и схема расположения аппаратуры для реализации используемых методик измерений. Жидкость в канал через плоское сопло 1. Сопло располагалось в пластине из нержавеющей стали в нижней части рабочего участка. Газ подавался в центральную часть канала 3. Регистрация взаимодействия газожидкостных потоков осуществлялась в области 12 цифровыми видео- и фотокамерами с использованием шпирен-метода с отражением оптического луча от границы раздела газ—жидкость (4–7). Для изучения взаимодействия жидкости газа в каналах был использован также метод лазерно-индуцированной флуоресценции, который основан на переизлучении флуорофором поглощенного света с отличным от возбуждающего излучения спектральным составом. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода с добавлением флуорофора Родамин 6G, а в качестве газа — азот. Для создания опорного излучения использовался лазер 9 мощностью 50 mW с длиной волны 532 nm. С помощью цилиндрической линзы 6 лазерный луч разворачивался в линию, которая располагалась поперек газожидкостного потока на расстоянии 52 mm от места ввода жидкости в канал. Переизлучаемый флуоресцентный свет фиксировался цифровой камерой 8, оснащенной ступенчатым светофильтром низких частот 10, пропускающим переизлученный флуорофором свет и отсекающим излучение лазера. Камера позволяет с высокой частотой дискретизации (до 2.1 kHz) оцифровывать получаемый сигнал. Детальное описание установки, аппаратуры и методик измерений приведено в работах [4,5].

На рис. 2 приведена схема развития неустойчивости при движении потоков жидкости и газа в каналах высотой 0.42–0.49 mm и шириной 20–40 mm. Показаны зависимости яркости свечения флуорофора (пропорционального толщине пленки) от времени (вид сверху), характеризующие развитие неустойчивостей, которые приводили к переходу между режимами двухфазного течения. Масштаб изменения времени составлял 0.5 s и соответствовал высоте каждого кадра. Ширина изображения соответствовала ширине канала. В качестве координат использованы приведенные скорости газа U_{SG} и жидкости U_{SL} , которые определялись как объемный расход газа или жидкости, деленный на площадь поперечного сечения канала. Границы режимов течения для канала сечением 0.49×20 mm обозначены сплошными линиями, а направления развития неустойчивостей показаны стрелками.

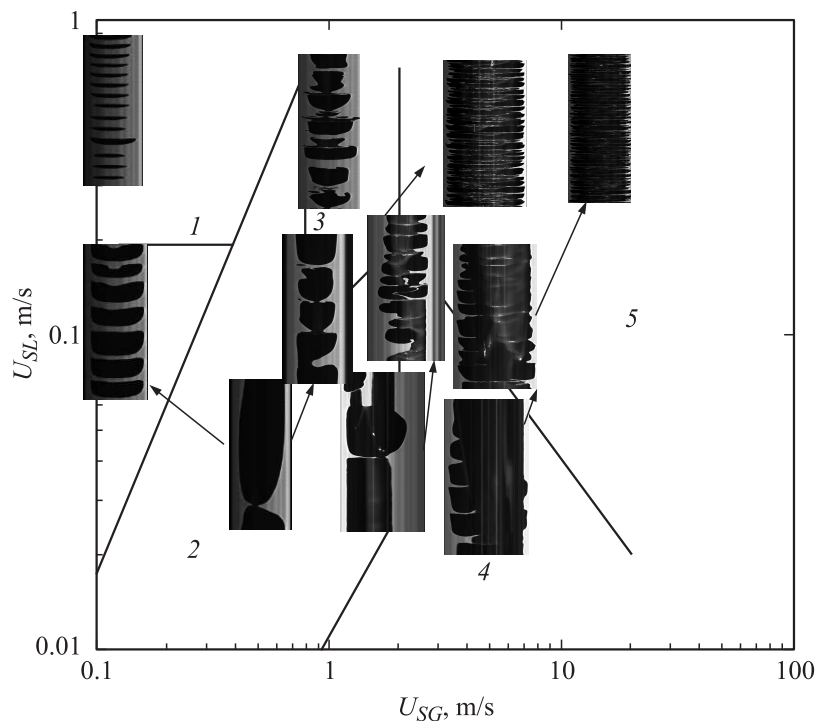


Рис. 2. Схема развития боковой неустойчивости при движении потоков жидкости и газа в каналах высотой 0.42–0.49 mm и шириной 20–40 mm. Режимы течения для канала 0.49 × 20 mm: 1 — пузырьковый, 2 — струйный, 3 — вспененный, 4 — раздельный, 5 — кольцевой.

В каналах высотой от 200–500 μm жидкость выходила из сопла 1 (рис. 1) и под действием капиллярных сил перемещалась в боковые части канала. Только при малых значениях приведенной скорости газа и достаточно высоких значениях приведенной скорости жидкости формирование пузырей происходило вблизи входа жидкости в канал. В случае снарядного режима ширина пузырей была близка к ширине канала.

При очень малых приведенных скоростях жидкости $U_{SL} < 0.04 \text{ m/s}$ газ двигался в центральной части канала, а основная часть жидкости

перемещалась по его периферии вдоль боковых стенок. Возмущения на поверхности жидкости не наблюдались. Увеличение приведенной скорости газа приводило только к увеличению доли газа в поперечном сечении канала. Неустойчивость течения жидкости возникала при увеличении ее приведенной скорости, но в зависимости от величины приведенной скорости газа ее характеристики существенно отличались (см. нижний ряд фрагментов на рис. 2).

Стационарный струйный режим, как и в работе [4], наблюдался при малых приведенных скоростях жидкости и газа. Увеличение приведенной скорости жидкости приводило к потере устойчивости двухфазного потока. Толщина слоя жидкости вдоль боковых стен канала изменялась во времени с частотой 0.1–3 Hz. Наблюдались нарастающие пульсации газовой струи, подобные приведенным в [4,5]. При струйном течении в канале одновременно могло существовать не более одной перемычки. При возникновении второй устойчивой перемычки происходил переход к снарядному режиму.

Переход от струйного режима к вспененному сопровождался появлением сплошных заполненных перемычек, которые были устойчивы и число которых в канале превышало единицу. На границе вспененного режима регистрировались 1–2 сплошных перемычек жидкости в секунду. С увеличением приведенной скорости газа количество перемычек увеличивалось до 2–4 в секунду, а при максимальной приведенной скорости газа их количество достигало 6–8 в секунду. В этом случае формирование вспененного режима обусловлено развитием неустойчивости струйного режима и увеличением частоты взаимодействия жидкости, поступающей с боковых сторон канала. При переходе к кольцевому режиму течения сплошные заполненные перемычки жидкости исчезают.

В области высоких скоростей газа, при увеличении приведенной скорости жидкости, происходил переход от раздельного к кольцевому течению жидкости. В случае раздельного течения часть жидкости двигалась по нижней стенке канала в виде пленки, увлекаемой потоком газа. Газ двигался в центре канала и занимал существенно более половины его ширины. В области раздельного течения жидкости первые возмущения возникали после значительного периода ожидания в течение нескольких секунд. Подробно развитие возмущения данного типа описано в [6]. При увеличении приведенной скорости жидкости раздельный режим преобразовывался в кольцевой в результате увеличения частоты пульсаций и выброса жидкости на верхнюю стенку с боковых стенок

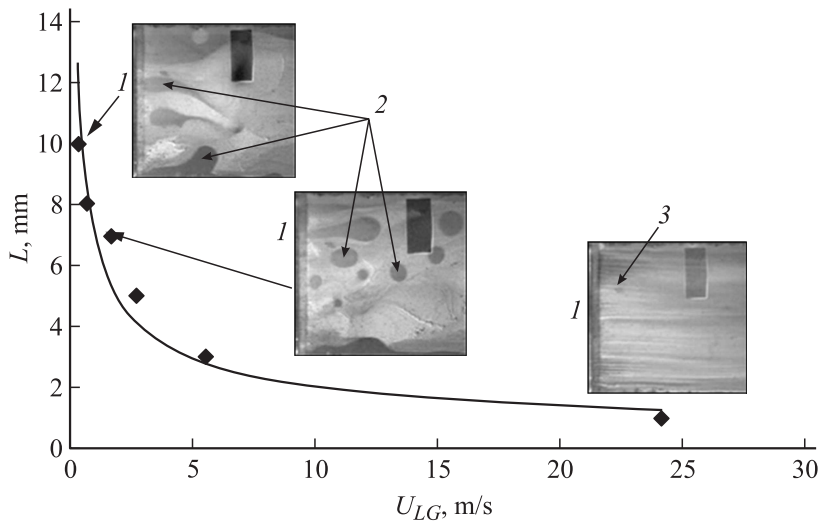


Рис. 3. Зависимость расстояния между жидкими струями или каплями, формирующимися при выходе жидкости из сопла, в результате развития фронтальной неустойчивости. 1 — плоское сопло для подачи жидкости, 2 — струи и капли жидкости, занимающие все сечение канала, 3 — струи жидкости на верхней поверхности канала.

канала. Кольцевой режим в этой точке измерения наступал при частоте пульсаций жидкости в боковой части канала в 20–30 Hz. Следует отметить, что основное влияние на частоту пульсаций жидкости оказывала приведенная скорость жидкости. В среднем ряде фрагментов (рис. 2) при изменении $U_{SL} = 0.1–0.2$ m/s и $U_{SG} = 0.4–7$ m/s частота пульсаций жидкости изменялась в диапазоне от 10 до 30 Hz, что примерно соответствовало переходу от струйного и раздельного режимов течения к снаряжному, вспененному и кольцевому. При максимальных значениях приведенной скорости жидкости $U_{SL} = 0.5–0.8$ m/s (см. верхний ряд фрагментов на рис. 2) на частоту пульсаций жидкости оказывала влияние также приведенная скорость газа, изменяя их значение от 30 Hz (пузырьковый режим) до 200 Hz (кольцевой режим).

Неустойчивость другого типа наблюдалась в канале высотой 100 μ m и возникала при выходе жидкости из сопла 1 (рис. 1, 3) в результате взаимодействия с газовым потоком. На рис. 3 показана зависимость

среднего расстояния между пузырями, струями жидкости или каплями, образующимися на фронте выхода жидкости из сопла, от приведенной скорости газа. Показаны шпирен-фотографии разных режимов течения. Двухфазный поток двигался слева направо. В левой части фотографии располагалось сопло жидкости. При наименьших значениях приведенных скоростей газа происходило формирование пузырей (высокие U_{SL}) и струй жидкости (низкие U_{SL}). В промежуточной области наблюдались режимы, в которых газовые пузыри находились в струях жидкости. В широкой области изменения $U_{SG} < 8$ m/s при $U_{SL} < 0.1$ m/s происходило формирование капель. С увеличением приведенных скоростей газа расстояние между соседними формируемыми каплями уменьшалось. При высоких значениях $U_{SG} > 10$ m/s поток газа разделял выходящую из сопла жидкость, направляя ее часть на верхнюю стенку канала в виде струй, расстояние между которыми составляло 1–2 mm.

Можно заключить, что в канале высотой $100 \mu\text{m}$ обнаружен новый тип неустойчивости — фронтальная неустойчивость, при взаимодействии жидкости и газа при выходе жидкости из сопла. Показано, что два типа неустойчивости (боковая и фронтальная) оказывают определяющее влияние на формирование режимов двухфазного течения в плоских горизонтальных микроканалах и переходы между ними.

Работа поддержана грантами СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 64) и Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК № 14.740.11.0103).

Список литературы

- [1] *Serizawa A., Feng Z., Kawara Z.* // Exp. Thermal Fluids Science. 2002. V. 26. P. 703–714.
- [2] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 10. С. 52–58.
- [3] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // ТВТ. 2006. Т. 44. № 5. С. 777–795.
- [4] *Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V.* // Microgravity science and technology. 2007. V. 19. N 3/4. P. 44–47.
- [5] *Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V.* et al. // Micro gravity science and technology. 2009. V. 21. Issue 1. P. 199–205.
- [6] *Чиннов Е.А., Гузанов В.В., Кабов О.А.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 14. С. 32–39.